

# 第二批国家级一流本科课程申报书

## （虚拟仿真实验教学课程）

课程名称：飞机机身壁板断裂力学虚拟仿真实验

专业类代码：080102

负责人：高存法

联系电话：025-84896237

申报学校：南京航空航天大学

填表日期：2021.4

推荐单位：南京航空航天大学

中华人民共和国教育部制

二〇二一年四月

## 填报说明

- 1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。
- 2.文中○为单选；□可多选。
- 3.团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。
- 4.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
- 5.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。
- 6.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

## 1. 基本情况

实验名称	飞机机身壁板断裂力学虚拟仿真实验	是否曾被推荐	○是 √否
实验所属课程 (可填多个)	飞行器结构力学、断裂力学、飞行器结构试验技术		
性质	○独立实验课 √课程实验		
实验对应专业	工程力学、飞行器设计与工程		
实验类型	○基础练习型 √综合设计型 √研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	<input type="checkbox"/> 高危或极端环境 √高成本、高消耗 √不可逆操作 <input checked="" type="checkbox"/> 大型综合训练		
实验语言	<input checked="" type="checkbox"/> 中文 <input type="checkbox"/> 中文+外文字幕(语种) <input type="checkbox"/> 外文(语种)		
实验已开设期次	共 次： 1. 时间、人数 2. 时间、人数 3. ...		
有效链接网址	(要求填写标准 URL 格式的实验入口网页，不允许仅为文件下载链接)		

## 2. 教学服务团队情况

2-3 团队主要成员教学情况 (限 500 字以内)
<p>(近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况)</p> <p><b>1. 主持的教学研究课题</b></p> <p>[1] 工程力学品牌专业与一流学科协同建设的研究与实践，江苏省高等教育教改课题重点项目，2018.1-2020.12，结题，主持</p> <p><b>2. 发表的教学研究论文</b></p> <p>[1] 黄岚，王成华，高存法，赵玉涛. 以优势学科为依托的高校品牌专业建设个案研究，中国大学教学, 2017, 11: 43-45.</p> <p><b>3. 获得的教学表彰/奖励</b></p> <p>[1] 全国高校黄大年式教学团队负责人，2018</p> <p>[2] 依托优势学科，构建与实践工程力学专业创新人才培养新体系，国家教学成果奖一等奖，2018，排名 1/15</p>

- [3] 工程力学专业拔尖创新人才贯通式培养体系的构建与实践, 江苏省教学成果特等奖, 2017, 排名 1/15

#### 4. 近五年承担的部分学术研究课题

- [1] 国家自然科学基金重点项目, 动态载荷作用下压电材料的断裂, 2013.01-2017.12, 已结题, 主持
- [2] 国家自然科学基金面上项目, 电磁固体表面 Maxwell 应力对固体断裂的效应, 2015.01-2018.12, 已结题, 主持
- [3] 国家自然科学基金面上项目, 含硬夹杂软材料的力学行为研究, 2019.01-2022.12, 在研, 主持
- [4] 国家自然科学基金创新研究群体项目, 飞行器整体结构的制造与监测, 2020.01-2024.12, 在研, 主要参与者
- [5] 国家自然科学基金航天先进制造技术研究联合基金, 空间太阳能电池阵失效机理与抑制方法研究, 2020.01-2023.12, 在研, 主要参与者。

#### 5. 近五年在国内外公开发行人物上发表的学术论文

- [1] Yuhao Li, Chuanbin Yu, Yingye Gan, Peng Jiang, Junxi Yu, Yun Ou, Dai- Feng Zou, Cheng Huang, Jiahong Wang, Tingting Jia, Qian Luo, Xue-Feng Yu, Huijuan Zhao, **Cun-Fa Gao\***, Jiangyu Li. Mapping the Elastic Properties of Two-Dimensional Mos2 Via Bimodal Atomic Force Microscopy and Finite Element Simulation. NPJ Computational Materials, 2018, 4: 49.
- [2] Jian Hua, Hongshuai Lei, **Cun-Fa Gao\***, Xiaogang Guo, Daining Fang , Parameters Analysis and Optimization of A Typical Multistable Mechanical Metamaterial, Extreme Mechanics Letters, 2020, 35: 100640.
- [3] Pengyu Pei, Yan Shi, Luqiao Qi, **Cun-Fa Gao\***, Effects of thermal stress on the failure of soft matter with sharp-hard inclusion, Acta Mechanica, 2019, 230:1843-1853.
- [4] Min Li, C.Q. Ru, **Cun-Fa Gao\***, An Alternative Method for Indentation of an Elastic Thin Beam by a Rigid Indenter, International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 149: 508-513.
- [5] Pengyu Pei, Yan Shi, Guang Yang, **Cun-Fa. Gao\***, Fracture Analyses of Soft Materials with Hard Inclusion, Journal of Applied Mechanics-Transaction of the ASME, 2018, 85: 111003.

#### 6. 获得的学术研究表彰/奖励

- [1] 压电材料的断裂, 国家自然科学基金二等奖 (排名第二), 2007
- [2] 全国优秀博士学位论文获得者, 2003
- [3] 江苏省“333 高层次人才培养工程”中青年科技领军人才, 2010

注: 必要的技术支持人员可作为团队主要成员; “承担任务”中除填写任务分工内容外, 请说明属于在线教学服务人员还是技术支持人员。

### 3. 实验描述

#### 3-1 实验简介（实验的必要性及实用性，教学设计的合理性，实验系统的先进性）

飞行器结构力学课程群（包含《弹性力学》、《结构力学》和《断裂力学》）是面向飞机结构强度设计的力学人才培养计划中最重要的专业基础课。但长期以来，由于理论性强、概念抽象，这些力学课程只开设很少量的实验学时，且实验对象是高度简化的杆板式薄壁结构模型，与实际飞行器结构相去甚远，已不能满足对卓越工程师人才的培养要求。与此同时，当代飞机结构设计广泛采用损伤容限准则，是在弹性力学和结构力学的基础上，以断裂力学方法分析含裂纹结构而发展起来的设计准则，对提高飞机结构的安全性具有重要的意义。

飞机机身壁板断裂力学虚拟仿真实验是为培养面向飞机结构强度的优秀力学人才而设计的综合性交互实验项目。实验按照“能实不虚”的仿真实验理念，围绕含裂纹机身壁板结构剩余强度预测、剩余寿命预测和胶接修补补强等环节打造，可用于航空航天院校工程力学、飞行器设计与工程等专业的课程教学，满足包括包含《弹性力学》、《结构力学》和《断裂力学》等课程在内飞行器结构力学课程群的实验需求。实验总体框架设计共包括含裂纹机身壁板静态断裂行为、含裂纹机身壁板疲劳断裂行为及含裂纹机身壁板补强断裂行为等三个模块，旨在对含裂纹飞机结构力学教学实验提供兼具安全性、综合性、客观性、全面性、交互性的情景模拟，使学生理解和掌握飞机结构损伤容限设计方法的核心力学基础。

通过本实验将实现以下教学目的：

- （1）教学内容的贯通：在一个教学实验中，融合贯通断裂力学中线弹性断裂力学、静态断裂行为、疲劳断裂行为等课程主要教学内容，全面提升学生对知识的掌握度。
- （2）理论与实践的贯通：克服传统力学课程理论晦涩、概念抽象的难点，融会贯通理论建模预测与工程实践验证，全面提升学生学习兴趣和学习能力。
- （3）知识与能力的贯通：克服传统教学实验流程标准化、结果一致化的不足，提高学生参与度和交互度，融会贯通知识获取与能力培养，全面提升学生自主学习能力和实践创新能力的发展。
- （4）教学平台的贯通：融入高等学校虚拟仿真实验教学共享平台，与兄弟院校相关的虚拟仿真实验贯通，形成完整系统的飞机结构力学仿真实验教学平台。

### 3-2 实验教学目标（实验后应该达到的知识、能力水平）

通过本实验将实现以下教学目标：

(1) 理解裂纹对结构应力、应变分布的影响以及线弹性断裂力学中最基本也是最重要的应力强度因子概念，掌握以应力强度因子和断裂韧性构成的含裂纹结构断裂准则，具备对含裂纹结构的剩余强度进行预测并进行实验验证的能力。

(2) 理解裂纹在疲劳载荷作用下的不同阶段的扩展机理，掌握以应力强度因子变程为驱动力的稳定扩展阶段裂纹疲劳扩展模型，具备对含裂纹结构在疲劳载荷作用下的剩余寿命进行预测并进行实验验证的能力。

(3) 理解实际工程中对含裂纹飞机结构进行补强的复合材料补片胶接修补方法的原理和步骤，掌握以实验方法获取结构应力强度因子的 James-Anderson 方法，具备综合应用理论知识对实际工程结构进行修补和分析的实践能力。

### 3-3 实验课时

(1) 实验所属课程课时：64 学时

(2) 该实验所占课时：2 学时

### 3-4 实验原理

(1) 实验原理(限 1000 字以内)

随着航空科学技术的飞速发展，飞机结构设计思想在不断更新。飞机结构由最初的静强度设计经历了安全寿命设计、破损安全设计的阶段逐步演进到现代的损伤容限设计，满足越来越高的安全性、可靠性和经济性的要求。

飞机损伤容限设计的基础是断裂力学。断裂力学是从生产实践中产生，自 20 世纪 70 年代发展起来的一门新兴学科，研究含缺陷材料和结构的破坏问题。由于它与材料或结构的安全直接相关，因此尽管出现时间很短，但实验和理论均有了迅速的发展，并已开始为生产服务，尤其是飞机结构设计领域。

当飞机结构中出现裂纹后，第一个首先要解决的问题是：飞机结构的剩余强度够不够？飞机在使用载荷作用下，是否能满足安全性的要求（即不引起结构破坏）？传统的材料力学、弹性力学或结构力学的强度条件是要使结构中的最大应力小于材料强度指标，即

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_s \quad (1)$$

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_b \quad (2)$$

式中， $\sigma_{\max}$  是结构中的最大应力， $\sigma_s$  和  $\sigma_b$  分别为材料的屈服极限和强度极限。但

断裂力学考虑了裂纹的存在,从裂纹尖端的应力强度因子和材料的断裂韧性出发,建立裂纹失稳准则,确定含裂纹结构的剩余强度,即

$$K_I \leq K_{IC} \quad (3)$$

式中,  $K_I$ 和  $K_{IC}$ 分别为裂纹尖端的应力强度因子和材料的平面应变断裂韧性。必须指出,  $K_I$ 和  $K_{IC}$ 是两个完全不同的概念,应力强度因子  $K_I$ 是由外加载荷及裂纹的形状和尺寸决定的量,是表示裂纹尖端应力场强度的一个参量,可以用弹性理论的方法进行计算;而断裂韧性  $K_{IC}$ 是材料具有的一种机械性能,表示材料抵抗脆性断裂的能力,由试验确定。

当飞机结构的剩余强度足够的时候,第二个需要解决的问题是:飞机结构的剩余寿命是多少?飞机还能飞行多少个起落(疲劳载荷循环),裂纹扩展会引起结构破坏?断裂力学认为:带裂纹的结构,只要裂纹不到临界长度(由裂纹失稳准则确定),仍可使用;在疲劳载荷作用下,裂纹缓慢扩展,直至达到临界长度,结构才失稳破坏。疲劳载荷每循环一周,裂纹的扩展量  $da/dN$  是材料的一个指标,表明材料抵抗裂纹扩展的能力。如初始裂纹长度  $a_i$ 、临界裂纹长度  $a_c$ 和裂纹扩展速率  $da/dN$  已知,则剩余寿命由式(4)求出,即

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{\left(\frac{da}{dN}\right)} \quad (4)$$

大量试验证明

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

式中,  $C$ 和  $m$ 是材料常数,是疲劳载荷的最大和最小应力强度因子的差,成为应力强度因子变程。

当飞机结构中的裂纹被检测出后,第三个需要解决的问题是:如何对飞机结构进行快速有效的修补以提高飞机结构的剩余强度和剩余寿命?复合材料补片胶接修补是国内外广泛应用的损伤飞机结构补强技术,具有快速、高效、对飞机气动外形影响小的特点。胶接修补对裂纹补强的本质机理在于降低了裂纹尖端的应力强度因子,提高了结构的剩余强度和剩余寿命。但由于补片的存在,难以通过理论分析方法获取裂纹尖端的应力强度因子,需要采用实验的方法获取,其中 James-Anderson 方法即是一种借助材料疲劳裂纹扩展速率性能确定裂纹应力强度因子的实验方法。

知识点: 共 9 个

### 1) 应力强度因子

应力强度因子是表征裂纹尖端应力-应变场强度的一个重要参量,可用于确定裂纹尖端的应力、应变、位移和应变能密度,其量纲是[力][长度]<sup>-3/2</sup>。

### 2) 断裂韧性

应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧性,与弹性模量、泊松比等参量类似,断裂韧性也是材料固有的性能常数,可以用于确定含裂纹结构的强度。

### 3) 剩余强度

结构在含有损伤(裂纹)的情况下,还能承受的载荷或应力称为结构的剩余强度,其可由应力强度因子和断裂韧性确定。

### 4) 裂纹稳定扩展

结构在疲劳载荷作用下,裂纹尖端缓慢向前扩展,在稳定扩展区裂纹扩展速率与应力强度因子变程存在一定的函数关系,可以用于预测裂纹的扩展。

### 5) 裂纹扩展速率

疲劳载荷作用下裂纹长度随循环次数的变化率,反映裂纹扩展的快慢,与裂纹尖端的应力强度因子变程有很大的关系。

### 6) Paris 裂纹扩展公式

应力强度因子幅度  $K$  是疲劳裂纹扩展的主要控制参量,裂纹扩展速率  $da/dN$  与应力强度因子幅度  $K$  有如下关系:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

### 7) 剩余寿命

疲劳裂纹从现有长度扩展至临界裂纹长度所经历的载荷循环次数,又称疲劳裂纹扩展寿命。

### 8) 裂纹胶接修补

采用胶接的复合材料加强件减缓或阻止疲劳裂纹的扩展,增强由于疲劳裂纹而耗损的结构区域力学性能,是一种高效、快速、低成本的结构修理技术。胶接修补后,由于复合材料补片的存在,一定程度上减小裂纹尖端的应力强度因子,降低裂纹在疲劳载荷下的扩展速率,提高含裂纹结构的剩余强度。

### 9) James-Anderson 方法

**James-Anderson** 方法是一种借助材料疲劳裂纹扩展速率性能确定裂纹应力强度因子的试验方法。其基本假设是：（1）相同应力比  $R$  的恒幅疲劳载荷下，同种材料的疲劳裂纹扩展曲线唯一；（2）复合材料补片的效应等效为降低应力强度因子的一个折减系数。

（2）核心要素仿真设计（对系统或对象的仿真模型体现的客观结构、功能及其运动规律的实验场景进行如实描述，限 500 字以内）

本实验项目的核心要素仿真设计体现在以下几个方面：

1) 虚拟仿真实验过程中的主要仪器设备以实体实验室的设备为基础建模，仿真度达到 95% 以上，并通过仪器设备认知环节给出实验涉及的主要设备的功能介绍。

2) 虚拟仿真实验过程中实验操作以及主要现象的仿真度达到 95% 以上，这些主要现象包括：试验机启动后液压油源发出的噪音、试验机进行加载过程中试验件产生变形及裂纹尖端逐渐张开、全场应变仪获取的全场应变信息、极限载荷到达时试验件突然断裂的现象以及由此发出的巨大断裂声、裂纹在疲劳载荷作用下的渐进扩展、光学显微镜视场中裂纹的清晰显示等。

### 3-5 实验教学过程与实验方法

本项目实验由一条情景主线引出并贯穿其中。情景主线先以 1988 年美国阿罗哈航空公司波音 737 客机因疲劳裂纹而引发前机身上部爆裂这一航空史上的经典案例，介绍本实验的背景，即裂纹对飞机结构的完整性具有重要的影响，需要对含裂纹结构进行科学的分析和实验，以保证飞机结构的安全性。然后构建了 2040 年某国产飞机的虚拟飞行和维护场景，使学生化身为检修和维护人员，检修发现结构中存在裂纹，并通过力学分析和实验验证含裂纹飞机结构的安全性，理解飞机结构损伤容限设计方法的力学原理。

实验第一模块是对含裂纹机身壁板静态断裂行为进行探究，对实验设备和实验步骤进行认知，用可视化的方法演示和验证在试验机加载作用下，含裂纹机身壁板变形和应力场分布，掌握应力强度因子的概念，以及以应力强度因子和材料断裂韧性为主要控制因素的含裂纹结构剩余强度分析方法。

实验第二模块是对含裂纹机身壁板疲劳断裂行为进行探究，演示和验证机身壁板中裂纹在疲劳载荷谱作用下的扩展与破坏行为，掌握以应力强度因子变程为

主要控制因素的疲劳裂纹扩展和剩余寿命的分析方法。

实验第三模块是对补强后的机身壁板断裂行为进行探究，演示含裂纹飞机结构的复合材料胶接补强技术以及补强后的疲劳裂纹扩展行为，验证补强的效果，掌握复杂结构应力强度因子的实验测试方法以及补强的机理，即复合材料补片降低了裂纹的应力强度因子。

3-6 步骤要求（不少于 10 步的学生交互性操作步骤。操作步骤应反映实质性实验交互，系统加载之类的步骤不计入在内）

(1) 学生交互性操作步骤，共 20 步

步骤序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	知识点复习并预测剩余强度	8			<input type="checkbox"/> 操作成绩 <input type="checkbox"/> 实验报告 <input type="checkbox"/> 预习成绩 <input type="checkbox"/> 教师评价报告
2	仪器设备与操作步骤认知	6			
3	仪器设备与操作步骤知识测试	5			
4	获取机身壁板试验件并固定于试验机	2			
5	设置全场应变仪及观测点	2			
6	设置试验机控制参数并加载开始使用载荷下试验	3			
7	继续试验获取试验件极限载荷	3			
8	完成实验模块一实验报告	8			
9	相关知识点复习并预测剩余寿命	8			
10	仪器设备与操作步骤认知	4			
11	仪器设备与操作步骤知识测试	3			

12	设置光学显微镜	1		
13	设置试验机控制参数并加载开始疲劳试验	5		
14	分析实验数据获取剩余寿命及裂纹扩展速率	3		
15	完成实验模块二实验报告	8		
16	扩展知识学习	2		
17	采用复合材料补片对裂纹进行胶接修补	2		
18	设置试验机控制参数并加载开始疲劳试验	5		
19	分析实验数据获取应力强度因子	3		
20	完成实验模块三实验报告	8		

## (2) 交互性步骤详细说明

前置操作：打开虚拟仿真实验平台

打开浏览器，在地址栏中输入实验项目网站网址，弹出欢迎界面（如图 1 所示），依次点击“实验背景”和“实验说明”，了解实验的背景以及实验的内容设置和知识点等情况；点击“开始实验”，正式进入实验的虚拟场景。



(a)

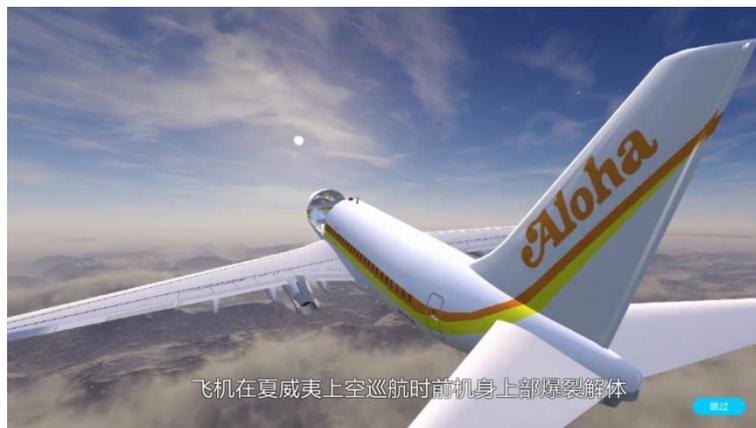


(b)

图 1 本项目的实验开始界面

背景学习：虚拟场景介绍真实案例背景及引出实验需求

以 1988 年美国阿罗哈航空公司波音 737 客机因疲劳裂纹而引发前机身上部爆裂这一航空史上的经典案例，学习本实验的背景（如图 2(a)和(b)所示）；构建 2040 年某国产飞机的虚拟飞行和维护场景，使学生化身为检修和维护人员，检修发现结构中存在裂纹，并通过力学分析和实验验证飞机结构的安全性（如图 2(c)和(d)所示）。



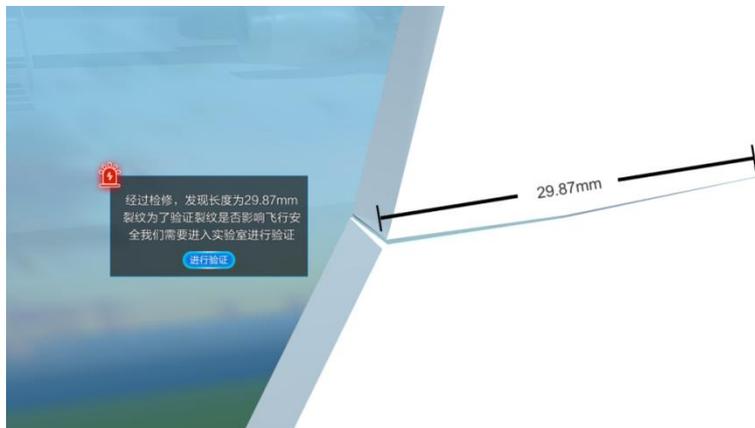
(a)



(b)



(c)



(d)

图2 本实验的案例背景介绍及虚拟情景

**步骤 1:** 在实验模块一的提示语处点击“确定”（如图 3(a)所示），弹出知识点复习和剩余强度预测界面，通过复习知识点，根据给定的计算模型以及给出的计算公式和材料参数，由理论知识预测含裂纹机身壁板结构的剩余强度。该步骤旨在进一步复习和掌握知识点，获得理论预测值以与实验结果进行比较。输入理论预测值后，点击“确定”进入下一步。



(a)



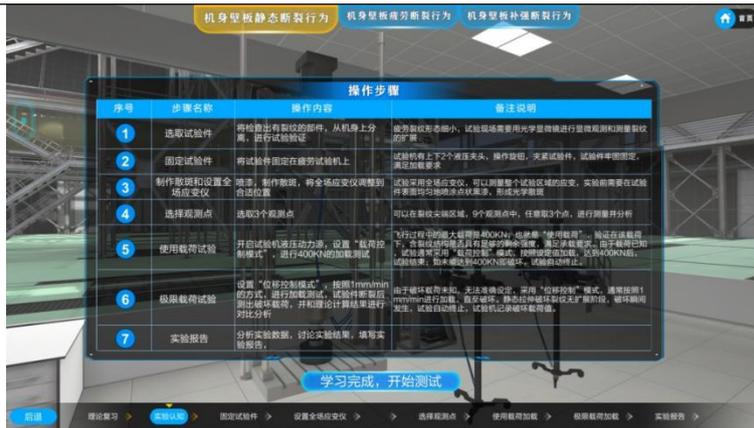
(b)

图 3 知识点复习和剩余强度预测界面

**步骤 2:** 依次点击各实验设备标签, 学习了解实验所设计的仪器设备功能和原理 (如图 4(a)所示), 点击“继续”后进入操作步骤学习界面, 依次点击各步骤序号, 了解各实验步骤的操作内容和注意事项 (如图 4(b)所示)。学习完成后, 点击“学习完成, 开始测试”, 进入测试步。



(a)



(b)

图4 仪器设备认知和操作步骤学习

**步骤3:** 在仪器设备和操作步骤知识测试环节 (如图5所示), 系统将随机生成五个有关仪器设备和操作步骤的测试题, 考察学生是否掌握了相关知识, 通过测试后才能进行下一步的实验操作。



图5 仪器设备和操作步骤知识测试

**步骤4:** 点击飞机机身的高亮部分, 从飞机上选取实验所需的机身壁板试验件 (如图6(a)所示), 通过操作疲劳试验机上、下夹头控制开关, 将机身壁板试验件固定在疲劳试验机上 (如图6(b)所示)。



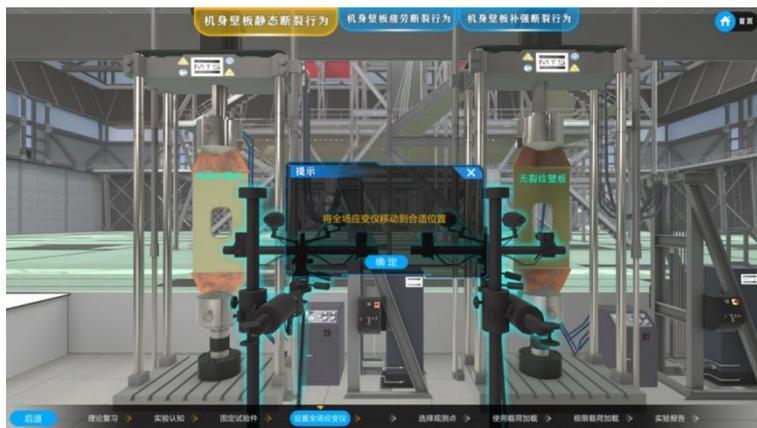
(a)



(b)

图6 选取和固定机身壁板试验件

**步骤5:** 点击全场应变仪，将全场应变仪移动到合适的位置（如图7(a)所示）。点击“确定”后，在试验件裂纹尖端的9个候选观测点处任意选择三个观测点用于获得载荷-应变曲线（如图7(b)所示）。点击“确认”后进入下一加载步骤。



(a)



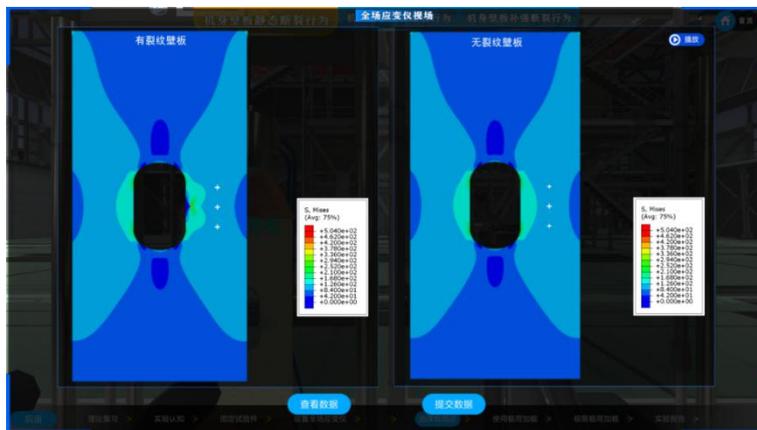
(b)

图 7 全场应变仪和观测点设置

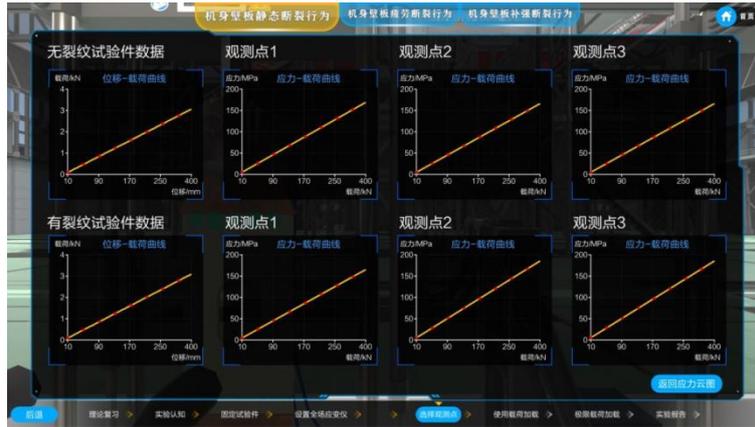
**步骤 6:** 点击油源控制开关，打开试验机油源；选择控制方式为“载荷控制”（默认），设定最大加载载荷为 400kN（此为默认的使用载荷）；点击“开始加载”，试验机液压作动筒即开始加载（如图 8(a)所示）。将会弹出全场应变仪观测界面，将有裂纹和无裂纹试件在载荷作用下的应力场可视化显示以便进行比较（如图 8(b)所示）。加载结束后，点击“查看数据”，将会显示试件的载荷-位移曲线，以及所选择观测点处的应力-载荷曲线（如图 8(c)所示）。确认数据后，点击“提交数据”，这些数据和曲线将会在实验报告中显示。



(a)



(b)



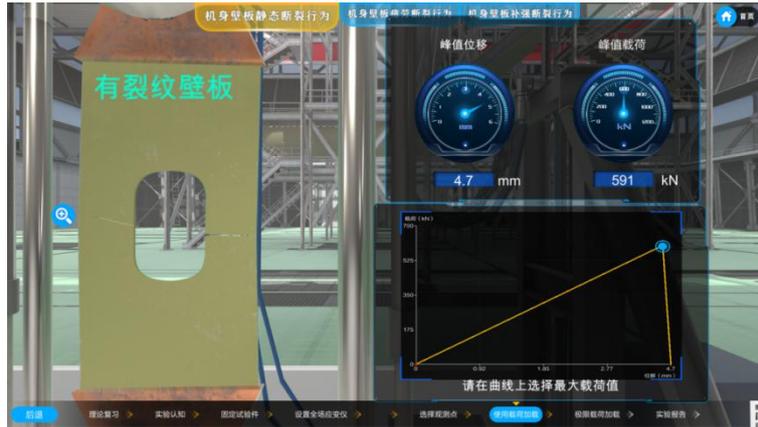
(c)

图 8 使用载荷下机身壁板静态力学行为试验

**步骤 7:** 在使用载荷作用下，机身壁板未发生破坏，表明裂纹产生后，机身壁板的剩余强度满足设计要求。为获得机身壁板的强度极限，需要对其继续加载，点击提示语中的“确定”（如图 9(a)所示）。弹出加载界面，采用位移控制模式对机身壁板继续加载，实时显示加载过程中的峰值位移、峰值载荷以及载荷-位移曲线，直至机身壁板破坏，载荷曲线下降至零。点击载荷-位移曲线中高亮的最高点，获取含裂纹机身壁板所能承受的极限载荷，与理论预测值进行比较（如图 9(b)所示）。



(a)



(b)

图 9 机身壁板极限载荷试验

**步骤 8:** 弹出实验模块一的实验报告，包括了理论预测的机身壁板剩余强度、实验获得的机身壁板剩余强度，以及试件的载荷位移曲线以及相应观测点的载荷-应力曲线。根据理论分析和实验测试结果，学生进行讨论和分析，填写第一部分实验报告（如图 10 所示）。填写完毕后，点击“提交”，完成实验模块一的内容，进入下一实验模块。

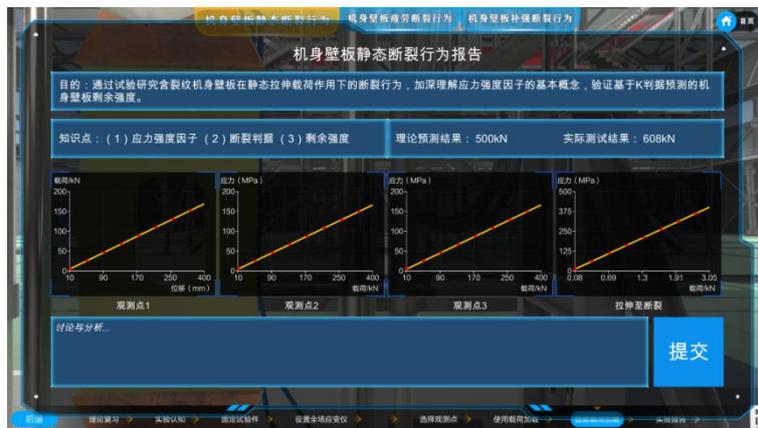
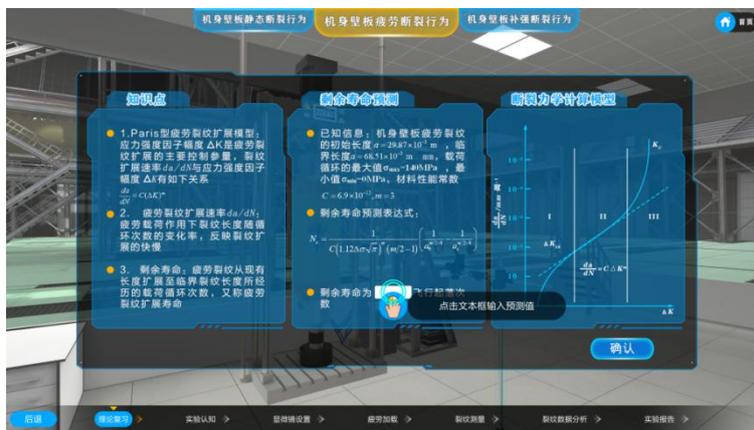


图 10 实验模块一实验报告

**步骤 9:** 在实验模块二的提示语处点击“确定”（如图 11(a)所示），弹出知识点复习和剩余寿命预测界面，通过复习知识点，根据给定的计算模型以及给出的计算公式和材料参数，由理论知识预测含裂纹机身壁板结构的剩余寿命。该步骤旨在进一步复习和掌握知识点，获得理论预测值以与实验结果进行比较（如图 11(b)所示）。输入理论预测值后，点击“确定”进入下一步。



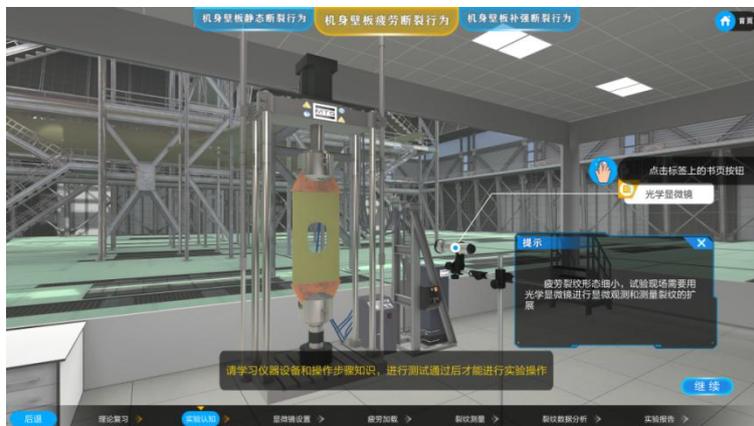
(a)



(b)

图 11 知识点复习和剩余强度预测界面

**步骤 10:** 依次点击各实验设备标签，学习了解实验所设计的仪器设备功能和原理（如图 12(a)所示），点击“继续”后进入操作步骤学习界面，依次点击各步骤序号，了解各实验步骤的操作内容和注意事项（如图 12(b)所示）。学习完成后，点击“学习完成，开始测试”，进入测试步。



(a)



(b)

图 12 仪器设备认知和操作步骤学习

**步骤 11:** 在仪器设备和操作步骤知识测试环节 (如图 13 所示), 系统将随机生成三个有关仪器设备和操作步骤的测试题, 考察学生是否掌握了相关知识, 通过测试后才能进行下一步的实验操作。



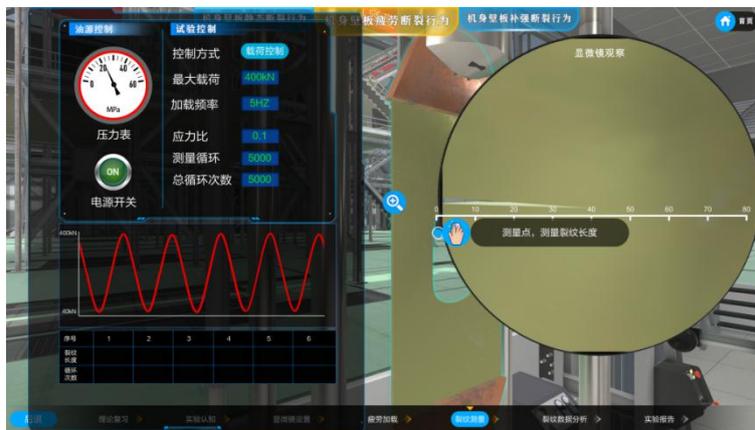
图 13 仪器设备和操作步骤知识测试

**步骤 12:** 点击光学显微镜, 将光学显微镜移动到合适的位置 (如图 14 所示)。点击“确定”后, 将光学显微镜对准裂纹尖端, 用于在疲劳试验中观测裂纹的扩展情况。点击“确定”后进入下一加载步骤。

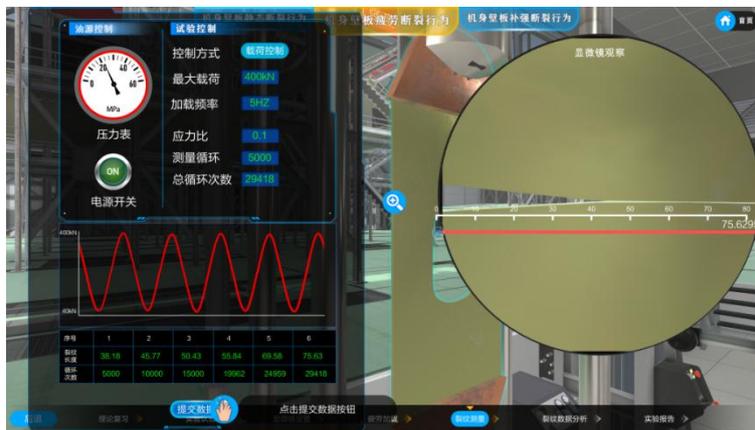


图 14 光学显微镜设置

**步骤 13:** 点击油源控制开关，打开试验机油源；选择控制方式为“载荷控制”（默认），设定最大加载载荷为 400kN（此为默认的使用载荷）、加载频率 5Hz（默认设置）、应力比 0（默认设置）、测量循环 5000（默认设置）；点击“开始加载”，试验机液压作动筒即开始加载（如图 15(a)所示）。点击放大符号，可以弹出显微镜视场，对裂纹进行放大观测。到达设定的测量循环，试验机会自动停机，此时在显微镜视场中点击标尺处的圆点，获得裂纹的长度值，并自动填入表格（如图 15(b)所示）。点击“继续加载”，试验机将会继续对试件施加疲劳载荷，直至下个测量循环到达。反复进行加载和测量，直至裂纹扩展至临界长度而破坏，点击“提交数据”，将获得的裂纹随载荷循环的扩展数据提交系统，并进入数据显示界面。



(a)



(b)

图 15 裂纹疲劳扩展实验

**步骤 14:** 对裂纹扩展数据进行观察和处理，获取与裂纹临界长度对应的疲劳载荷循环即为试验获得的结构剩余寿命（如图 15(a)所示）；点击“计算裂纹扩展速率”，弹出双对数坐标系下的裂纹扩展速率数据，对数据进行线性拟合获取拟合直线方程，即可从方程的系数获取 Paris 公式中的材料性能常数（如图 15(b)所示）。



(a)



(b)

图 16 裂纹扩展数据处理

**步骤 15:** 弹出实验模块二的实验报告，包括了理论预测的机身壁板剩余寿命、实验获得的机身壁板剩余寿命，以及试验件在疲劳载荷作用下的裂纹扩展曲线以及裂纹扩展速率与应力强度因子变程的双对数图。根据理论分析和实验测试结果，学生进行讨论和分析，填写第二部分实验报告。填写完毕后，点击“提交”，完成实验模块二的内容，进入下一实验模块。

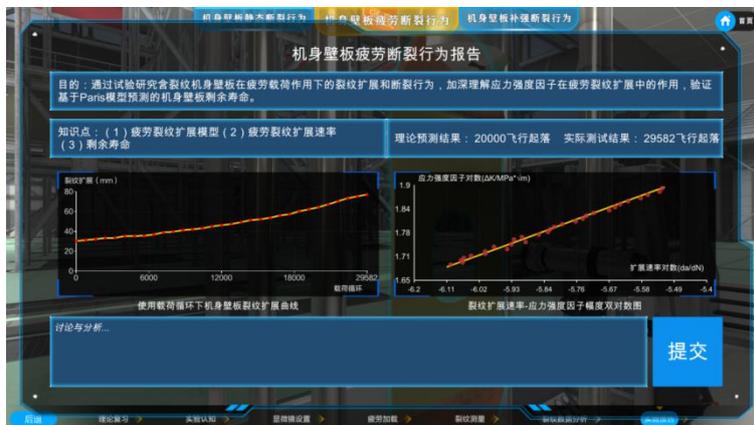
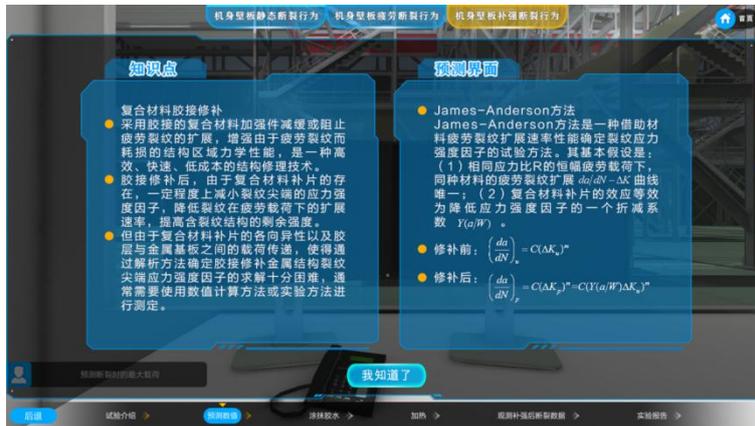


图 17 实验模块二实验报告

**步骤 16:** 在实验模块三的提示语处点击“确定”（如图 18(a)所示），弹出复合材料胶接修补以及 James-Anderson 方法的知识拓展（如图 18(b)所示）。对这些知识进行学习和理解后，进行下一步的实验操作，对含裂纹机身壁板结构进行修补并实验研究其力学性能，获取裂纹尖端应力强度因子。



(a)



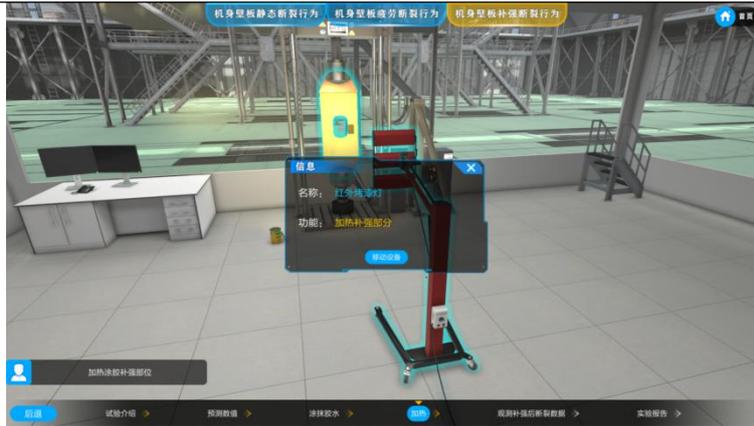
(b)

图 18 胶接修补含裂纹结构知识拓展

**步骤 17:** 在机身壁板裂纹处涂刷环氧树脂胶水，并将复合材料补片粘贴上去（如图 19(a)所示），采用红外加热灯，将复合材料补片固化成型（如图 19(b)所示）。



(a)



(b)

图 19 胶接修补含裂纹机身壁板结构

**步骤 18:** 点击油源控制开关，打开试验机油源；选择控制方式为“载荷控制”（默认），设定最大加载载荷为 400kN（此为默认的使用载荷）、加载频率 5Hz（默认设置）、应力比 0（默认设置）、测量循环 5000（默认设置）；点击“开始加载”，试验机液压作动筒即开始加载。点击放大符号，可以弹出显微镜视场，对裂纹进行放大观测。到达设定的测量循环，试验机会自动停机，此时在显微镜视场中点击标尺处的圆点，获得裂纹的长度值，并自动填入表格（如图 20 所示）。点击“继续加载”，试验机将会继续对试件施加疲劳载荷，直至下个测量循环到达。反复进行加载和测量，直至裂纹扩展至临界长度而破坏，点击“提交数据”，将获得的裂纹随载荷循环的扩展数据提交系统，并进入数据显示界面。



图 20 胶接修补含裂纹机身壁板结构

**步骤 19:** 对补强后的裂纹扩展数据和补强前的裂纹扩展数据进行观察和处理，采用 James-Anderson 方法，借助材料疲劳裂纹扩展速率性能确定裂纹应力强度因子（如图 21(a)和(b)所示）。



(a)



(b)

图 21 胶接修补含裂纹机身壁板结构

**步骤 20:** 弹出实验模块三的实验报告，包括了补强前应力强度因子随裂纹长度变化的曲线，以及补强后应力强度因子随裂纹长度变化的曲线。根据实验测试结果，学生进行讨论和分析，填写第三部分实验报告。填写完毕后，点击“提交”，完成实验模块三的内容以及整个实验流程。

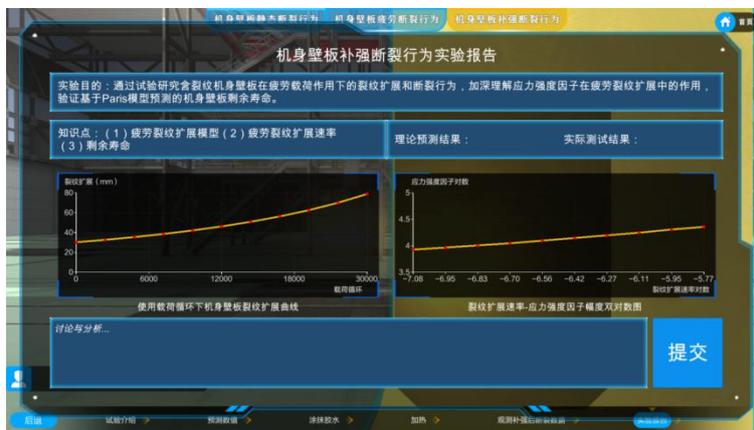


图 22 实验模块三实验报告

后记：任务完成，飞机补强后重返蓝天

通过实验证明，目前飞机机身壁板中存在的裂纹还在允许范围之内，结构的剩余强度满足使用载荷的安全要求；飞机机身壁板还具有足够的剩余使用寿命；对其进行胶接修补后，应力强度因子将显著下降。对飞机进行胶接修补后，飞机重返蓝天，标志着该实验的顺利完成。



图 23 经过维修和试验验证后飞机重返蓝天

### 3-7 实验结果与结论（说明在不同的实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论）

本实验项目共包含三个模块，分别对含裂纹机身壁板静态断裂行为、含裂纹机身壁板疲劳断裂行为、补强后的机身壁板断裂行为进行研究，形成完成的飞机机身壁板断裂力学知识的实验教学。

实验第一模块的研究目的是确认在含有裂纹的情况下，机身壁板在使用载荷作用下是否会断裂，即剩余强度是否能满足飞行使用要求。根据实验给定的力学模型以及初始参数，理论预测的结构破坏载荷为 600kN，而使用载荷仅为 400kN，因此结构剩余强度满足要求，实验第一阶段（最大载荷为使用载荷）机身壁板会产生相应的变形和应力，但裂纹不会失稳扩展导致结构破坏。实验第二阶段将进行极限载荷实验，在继续加载情况下，确定结构破坏所对应的极限载荷。为了模拟真实实验中所存在的随机性，在实验后台设置中，实验结果将会是 600kN 左右的随机数，与理论预测结果有一定的差别，既验证了理论的正确性，又考虑了实验对象和实验过程的不确定性。学生可以在实验报告中对结果的这种偏差进行讨论和分析。

实验第二模块的研究目的是确认在含有裂纹的情况下，机身壁板中裂纹在长期的疲劳载荷作用下扩展与破坏行为，即还具有多长的剩余使用寿命。根据实验给定的力学模型以及初始参数，理论预测的剩余使用寿命约为 29000 次飞行起落（载荷循环）。同样地，在实际结构疲劳试验中，材料和载荷都存在很多的不确定

性因素，获得的实验结果与理论预测结果可能会相差很大。为了很好地模拟这种不确定性的影响，在实验后台设置中，实验结果将会是 30000 次左右的随机数；对应测得的裂纹扩展常数也将与给定的参数值有一定的差别。学生可以在实验报告中对结果的这种偏差进行讨论和分析。

实验第三模块的研究目的是演示含裂纹飞机结构的复合材料胶接补强技术以及补强后的疲劳裂纹扩展行为，掌握复杂结构应力强度因子的实验测试方法以及补强的机理，即复合材料补片降低了裂纹的应力强度因子。此部分为知识应用拓展部分，不设立理论预测步骤，仅对实验获得的裂纹扩展数据，采用 James-Anderson 方法进行应力强度因子的测定。

### 3-8 面向学生要求

#### (1) 专业与年级要求

主要面向航空航天院校工程力学和飞行器设计与工程专业的三、四年级本科生和研究生。本实验项目也可以面向其他航空航天类和机械类专业学生，通过虚拟仿真动画演示和应用实例展示，让学生了解飞机机身壁板断裂力学实验过程以及飞机结构损伤容限设计的相关知识。

#### (2) 基本知识和能力要求

进行本项目实验学习的学生，应掌握飞行器结构力学的相关基础知识，已修读了《理论力学》、《材料力学》等先修课程，还应学习了《飞行器结构力学》、《断裂力学》等专业课程，对飞机结构强度有基本的了解。

### 3-9 实验应用及共享情况

(1) 本校上线时间： 年 月 日（上传系统日志）

(2) 已服务过的学生人数：本校 人，外校 人

(3) 附所属课程教学计划或授课提纲并填写：

纳入教学计划的专业数： ， 具体专业： ，

教学周期： ， 学习人数：

(4) 是否面向社会提供服务：是 否

(5) 社会开放时间： 年 月 日

(6) 已服务过的社会学习者人数： 人

## 4. 实验教学特色

（该虚拟仿真实验教学课程的实验设计、教学方法、评价体系等方面的特色，限800字以内）

本实验项目的主要特色有：

### (1) 真实案例结合虚拟场景的情景主线

建立了引导性的情景主线，以航空史上的真实发生的飞机结构安全事故案例（1988年美国阿罗哈航空公司波音737客机由裂纹引起机身结构空中爆裂）为引子，介绍了实验的背景知识，使得学生理解断裂力学知识对飞机损伤容限设计的重要性，激励学生更好地掌握理论知识；构建了2040年某国产飞机的虚拟飞行和维护场景，使学生化身为检修和维护人员，检修发现结构中存在裂纹，并通过力学分析和实验验证飞机结构的安全性，将实验具体化为具体的任务，而不仅仅是教学实验。实验任务完成后，通过对飞机结构的维修，飞机安全返航蓝天。情景主线贯穿始终，构成一个完整的情节。

### (2) “基础-提高-应用”递进式融会贯通的实验任务设计

应力强度因子是断裂力学中最基础也是最核心的知识点，本项目围绕应力强度因子这一核心概念，融会贯通线弹性断裂力学基础、疲劳断裂力学、断裂力学应用

等课程教学内容，设计了机身壁板静态断裂行为、机身壁板疲劳断裂行为、机身壁板补强断裂行为三个实验模块，形成了“基础-提高-应用”递进式的实验方案，使学生分别掌握以应力强度因子为基础的剩余强度预测方法、以应力强度因子变程为驱动力的裂纹疲劳扩展和剩余寿命预测方法、以降低裂纹尖端应力强度因子为途径的损伤结构胶接补强技术，培养学生综合应用知识的能力以及解决实际工程结构中的力学问题的能力。

### (3) 理论与实际结合，过程性考核与总结性考核结合

在每个实验模块开始之前，对所涉及的知识点进行复习，并通过给定的断裂力学模型以及相应的公式和参数，预测机身壁板对应的力学性能，并将与之后实验获得的测试数据进行验证和比较，使得学生更好地巩固理论知识的学习，理论与实际相结合，理解其在实际工程结构中的应用。在每个实验模块开始之前，对实验所涉及的仪器设备进行认知，并详细介绍每个操作步骤的过程和原理。将进行阶段性的过程考核测试，考核通过之后方能进行相关的操作。这不仅引入了过程考核，考核成绩与最终的实验报告成绩相结合，同时也使学生养成良好的安全习惯，而不因为是虚拟实验而忽视安全操作。

## 5. 实验教学在线支持与服务

(1) 教学指导资源：教学指导书 教学视频 电子教材 课程教案

(申报系统上传) 课件 (演示文稿) 其他

(2) 实验指导资源：实验指导书 操作视频 知识点课件库 习题库

(申报系统上传) 测试卷 考试系统 其他

(3) 在线教学支持方式：热线电话 实验系统即时通讯工具 论坛

支持与服务群 其他

(4) 名提供在线教学服务的团队成员； 名提供在线技术支持的技术人员；教学团队保证工作日期间提供 小时/日的在线服务

## 6. 实验教学相关网络及安全要求描述

### 6-1 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）

20M 下行对等带宽。

经测试客户机带宽在 20M 以上时能够有较快的加载速度和较好的交互体验。

本次测试基于主流配置计算机，模拟学生在校内校外不同的使用环境，最大限度的还原用户上网学习虚拟仿真实验的需求。

测试一：物理连接链路测试，测试目的：测试客户机和虚拟仿真实验项目网站的延迟和丢包情况，测试方法：客户机对本次虚拟仿真实验项目网站进行 PING 操作。

测试二：网络质量测试，测试目的：测试不同网络环境访问本虚拟仿真实验页面的加载情况，测试方法：通过 IP 代理，测试客户机在不同地域环境下打开虚拟仿真实验项目网页的速度。

测试结果：

1、当客户机带宽小于 20M 时，丢包情况严重、网络延时都很高，部分环境延时可以达到 20ms 以上，丢包率超过 5%；

2、当客户机带宽小于 20M 的时候，在不同 IP 对本虚拟仿真实验网页打开的测试中，网页打开速度较慢，特别是课件加载卡顿现象也畅游发生，访问效果不理想。

基于以上测试结果，我们推荐客户机的带宽应大于 20M。

(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

本虚拟仿真项目的服务器最佳响应并发数为 300。

我们模拟用户访问虚拟仿真项目网站首页、用户登录和加载课件等操作。

经测试，当用户数量达到在 300 以下时，各项服务均能在 0.2s 内做出响应，服务器负载处于较低水平，课件加载也很快。当用户数达到 2000 服务响应时间维持在 0.8s 以内，但课件加载速度下降严重。当用户数达到 6000 时服务响应时间超过 1s，服务器负载也超过了 80%。

基于以上测试结果我们认为本虚拟仿真项目服务器的最佳响应并发数为 300。

**6-2 用户操作系统要求**（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

计算机操作系统为 Windows7、Windows8、Windows10, Deepin15.7（国产 Linux 系统）。

(2) 其他计算终端操作系统和版本要求

无

(3) 支持移动端：是 否

**6-3 用户非操作系统软件配置要求**（兼容至少 2 种及以上主流浏览器）

(1) 非操作系统软件要求（支持 2 种及以上主流浏览器）

谷歌浏览器 IE 浏览器 360 浏览器 火狐浏览器 其他

(2) 需要特定插件 是 否

如勾选“是”，请填写：

插件名称：（插件全称）

插件容量：M

下载链接：

(3) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可提供相关软件下载服务）

**6-4 用户硬件配置要求**（如主频、内存、显存、存储容量等）

(1) 计算机硬件配置要求

Web 端 用户硬件要求

处理器：Intel (R) Core (TM) i5 以上

主频：2.4GHz 以上

内存：8GB 以上

显卡：NVIDIA GeForce GTX GT740 2G 以上

(2) 其他计算终端硬件配置要求

无特殊要求，满足能上网功能即可。

**6-5 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）**

(1) 计算机特殊外置硬件要求

无

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求：√无 ○有

如勾选“有”，请填写其他计算终端特殊外置硬件要求：

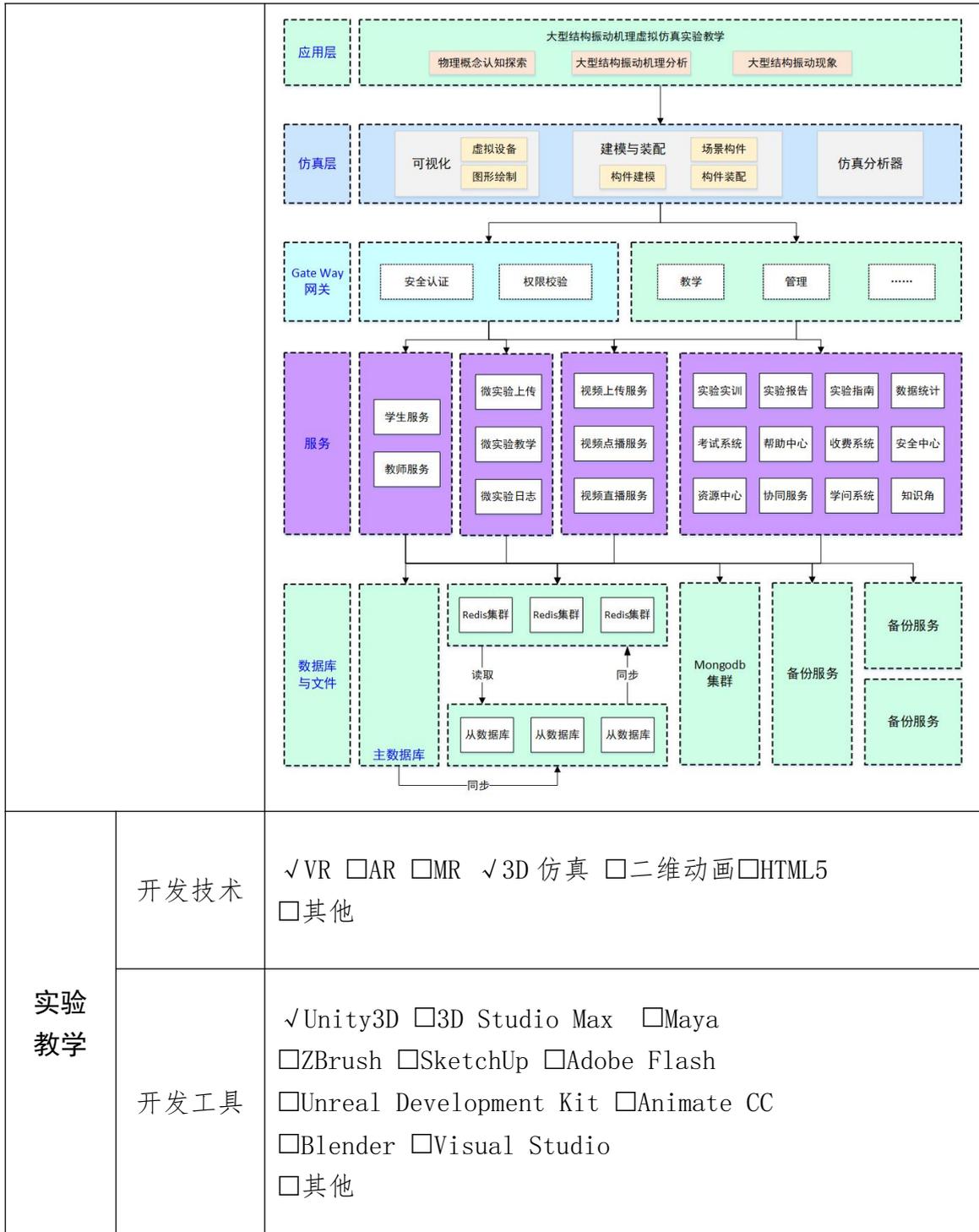
**6-6 网络安全（实验系统要求完成国家信息安全等级二级认证）**

(1) 证书编号：

(2) 请附信息系统安全等级保护备案证明

**7. 实验教学技术架构及主要研发技术**

指标	内容
系统架构图及简要说明	用户通过 PC 端或者 WEB 端进入虚拟实验，自主选择实验项目，系统通过模块调用、数据交互，完成用户请求实验展示。



运行环境	<p><b>服务器</b> CPU 核、内存 GB、磁盘 GB、 显存 GB、GPU 型号</p> <p><b>操作系统</b> <input type="checkbox"/>Windows Server <input type="checkbox"/>Linux <input type="checkbox"/>其他 具体版本：</p> <p><b>数据库</b> <input type="checkbox"/>Mysql <input type="checkbox"/>SQL Server <input type="checkbox"/>Oracle <input type="checkbox"/>其他</p> <p><b>备注说明</b>(需要其他硬件设备或服务器数量多于 1 台时请说明)</p> <p><b>是否支持云渲染：</b> <input type="radio"/>是 <input type="radio"/>否</p>
实验品质 (如：单场景模型总面数、贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等)	<p>单场景模型总面数：40 万三角面 贴图分辨率：512*512 每帧渲染次数：30fps 动作反馈时间：1/90s 显示刷新率：60HZ 分辨率：4K</p>

## 8. 实验教学课程持续建设服务计划

(本实验教学课程今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

### (1) 课程持续建设

日期	描述
第一年	
第二年	
第三年	
第四年	
第五年	

其他描述：

(2) 面向高校、社会的教学推广应用计划

日期	推广高校数	应用人数	推广行业数	应用人数
第一年				
第二年				
第三年				
第四年				
第五年				

其他描述：

## 9. 知识产权

软件著作权登记情况	
以下填写内容须与软件著作权登记一致	
软件名称	
是否与课程名称一致	<input type="radio"/> 是 <input type="radio"/> 否
每栏只填写一个著作权人，并勾选该著作权人类型。如勾选“其他”需填写具体内容；如存在多个著作权人，可自行增加著作权人填写栏进行填报。	

著作权人	著作权人类型
	<input type="radio"/> 课程所属学校 <input type="radio"/> 企业 <input type="radio"/> 课程负责人 <input type="radio"/> 学校团队成员 <input type="radio"/> 企业人员 <input type="radio"/> 其他
权利范围	
软件著作权登记号	
如软件著作权正在申请过程中，尚未获得证书，请填写受理流水号。	
受理流水号	

## 10. 诚信承诺

<p>本团队承诺：申报课程的实验教学设计具有一定的原创性，课程所属学校对本实验课程内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验课程的一切资源）享有著作权，保证所申报的课程或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。</p> <p style="text-align: center;">实验教学课程负责人（签字）：</p> <p style="text-align: right;">年    月    日</p>
---

## 11. 附件材料清单

### **1. 课程团队成员和课程内容政治审查意见（必须提供）**

（申报课程高校党委负责对本校课程团队成员以及申报课程的内容进行政审，出具政审意见并加盖党委印章；团队成员涉及多校时，各校党委分别对本校人员出具意见；非高校成员由其所在单位党组织出具意见。团队成员政审意见内容包括政治表现、是否存在违法违纪记录、师德师风、学术不端、五年内是否出现过重大教学事故等问题；课程内容审查包括价值取向是否正确，对于我国政治制度以及党的理论、路线、方针、政策等理解和表述是否准确无误，对于国家主权、领土表述及标注是否准确，等等。）

### **2. 课程内容学术性评价意见（必须提供）**

〔由学校学术性组织（校教指委或学术委员会等），或相关部门组织的相应学科专业领域专家（不少于3名）组成的学术审查小组，经一定程序评价后出具。须由学术性组织盖章或学术审查小组全部专家签字。无统一格式要求。〕

### **3. 校外评价意见（可选提供）**

（评价意见作为课程有关学术水平、课程质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由课程应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）

# 南京航空航天大学

## 课程教学大纲

课程编号			开课学院	一院	开课系	0132
课程名称	中文	飞行器结构力学		课程类别	理论	
	英文	Aircraft Structural Mechanics				
课程学时	总学时	理论教学	实验教学	上机	课程设计	
	32	30	2		1.有    √2.无	

**课程简介：**

简要描述课程的性质及专业地位，培养目标（理论、能力和技能）

本课程是飞行器设计与工程专业十分重要的专业必修课程，是一门理论性、逻辑性、分析计算性很强的课程，也是飞行器结构设计等专业课程的基础。本课程的任务是使学生掌握飞行器结构的模型简化方法、结构组成的分析方法，掌握静定和超静定杆板薄壁结构的内力和位移计算方法，杆板薄壁梁自由弯曲和自由扭转的正应力、剪应力和位移计算方法，了解杆板薄壁结构的受力和变形特点，为后继的飞行器结构设计课程打好必要的基础，并为今后从事本专业的工作获得必要的技能。

本门课程的教学注重引入工程实例，提高了学生的工程素质，除掌握工程结构的分析计算方法外，注重提高学生在数学力学层面解决问题的能力，达到培养学生工程能力、抽象能力、分析计算能力的作用。

**前修课程、能力和知识结构要求：**

明确学生学习本门课程的先修课程，主要能力和知识结构。

**先修课程：**高等数学、线性代数、理论力学、材料力学、弹性力学

**主要能力和知识结构：**学生在学习本课程时应具备微积分、常微分方程、线性代数、理论力学、材料力学和弹性力学方面的基础知识，对飞行器结构的背景有所了解。

课程结构说明：

对课程的组织结构进行简要说明，即明确课程所述内容由几个大的部分构成，每个部分的教学由哪几个环节或单元组成（如：理论授课、实验教学，上机实习，课外作业，随堂考试，讨论会，总结报告等）

本课程由绪论、结构组成分析、静定薄壁结构内力及位移、静不定薄壁结构内力及位移、薄壁梁的弯曲和扭转、结构的稳定六个部分组成，其结构和学时分配如下图所示。

序号	内 容	理论授课	实验教学	课堂讨论	课外作业
1	绪论	2			
2	结构组成分析	2			√
3	静定薄壁结构内力及位移	6		0.25	√
4	静不定薄壁结构内力及位移	8	1	0.5	√
5	薄壁梁的弯曲和扭转	8		0.5	√
6	结构的稳定	4	1	0.25	√
总学时	32	30	2		

课程重点讲解了受剪杆板式薄壁结构简化计算模型、结构组成特点和分析方法、静定和静不定受剪板杆式薄壁结构的内力和变形计算方法、薄壁梁式结构自由弯曲和自由扭转的内力和变形计算方法、以及受压和受剪结构的稳定性分析方法。

根据课程的特点，本课程的教学主要包括理论授课、讨论课、课外作业、考试。

课程知识结构说明：

明确课程涉及的学科知识领域、知识单元，每个知识单元由哪些知识点构成以及每个知识单元的学习目标，明确核心知识点（用“\*”标示）和扩展性知识点（用“ $\Delta$ ”标示）、必讲要求和选讲及自学要求。课程学时分布（按知识单元说明，并对核心知识点与较大的知识点进行必要的学时标注）。课程如包含实验或实践性等环节，还需要说明该部分的学时要求以及内容、方案和作用。

### **第一章 绪论 （2学时）**

介绍飞行器结构力学的研究对象、研究内容、研究方法、教学安排和教学要求。讲授受剪杆板式薄壁结构的计算简图：杆板梁等元件的简化、结点的简化、支座的简化、荷载的简化，并介绍工程中常见的结构形式。主要知识点：杆板式薄壁结构的计算简图，对各种简化合理性的理解。

本章核心知识点：结构的计算简图（“\*”）

### **第二章 结构的组成分析 （2学时）**

讲授几何可变系统和几何不变系统，自由度和约束、几何不变性等概念，组成几何不变系统的基本规则、瞬变系统的基本规则，以及平面和空间杆板式薄壁结构几何组成分析方法。

本章核心知识点：结构几何组成分析方法（“\*”）

### **第三章 静定受剪杆板式薄壁结构内力及位移 （6学时）**

讲授受剪杆板式薄壁结构杆、铰接点、受剪板的元件分析，静定杆板式薄壁结构的内力和位移计算方法，以及静定结构的受力传力特点。

本章核心知识点：平衡方程的应用、以及虚力原理在弹性位移计算中的应用（单位载荷法）（“\*”）

### **第四章 静不定受剪杆板式薄壁结构内力及位移 （8学时）**

讲授静不定受剪杆板式薄壁结构的受力传力特性，静不定杆板式薄壁结构内力的解法—力法，对称系统的简化计算，以及静不定杆板式薄壁结构的位移计算方法。

本章核心知识点：静不定结构内力的力法求解方法、以及虚力原理在弹性位移计算中的应用（“\*”）

本章扩展性知识点：力法的一般原理（“ $\Delta$ ”）

### **第五章 薄壁梁的弯曲和扭转 (8 学时)**

介绍薄壁梁的工程假设，讲授薄壁梁自由扭转时的正应力计算方法，自由扭转开剖面剪流、弯心计算方法，单闭室剖面剪流、扭角和弯心的计算方法，多闭室剖面剪流、扭角的计算方法。

本章核心知识点：开剖面剪流计算方法、剪流计算中扭距方程的应用、以及虚力原理在相对扭转角计算中的应用 (“\*”)

本章扩展性知识点：限制弯曲概念 (“ $\Delta$ ”)

### **第六章 结构的稳定 (4 学时)**

介绍结构稳定的概念，讲授薄板受压剪失稳分析的基本方程，薄板受压受剪的临界载荷计算方法，杆板式薄壁结构局部失稳和总体失稳，有效宽度概念，张力场概念。

本章核心知识点：薄板受压受剪的临界载荷计算方法 (“\*”)

本章扩展性知识点：张力场概念 (“ $\Delta$ ”)

### **实践教学部分 (2 学时)**

1. 受剪杆板式薄壁结构参加受力实验 (“\*”)
2. 薄壁梁结构的张力场实验 (“ $\Delta$ ”)

课程考核形式与要求:

明确课程考核成绩由几个部分构成,考核的侧重点,相对于知识单元(或课程的各个构成部分)大致的分数分配。考核形式(如开卷考试、闭卷考试、面试、停课考试、随堂考试、总结报告等)。

课程成绩构成:平时成绩(作业、考勤、答疑等)占 30%;考试成绩占 70%。

课程考试形式:闭卷、停课考试。

课程考试要求:几何组成分析,约占 10%;

静定杆板式薄壁结构内力及位移,约占 20%;

静定杆板式薄壁结构内力及位移,约占 30%;

薄壁梁的弯曲和扭转,约占 30%;

结构的稳定分析,约占 10%;

课程教授方法说明：

指出课程教学中的难点、建议的应对策略、方法以及教学手段。

本课程的教学包括理论讲授、课堂讨论、答疑辅导、课后作业等教学环节。针对课程教学中的难点，应对策略、方法以及教学手段主要有：

**难点 1：受剪杆板式薄壁结构计算简化模型的建立**

联系飞行结构的工程实例，对结构的受力传力特点进行分析，强调力学问题是从工程中归纳而来，加强学生的工程概念，增强学生处理工程问题的能力。

**难点 2：虚力原理在静不定结构内力计算、以及结构弹性位移计算中的应用，特别是静不定结构弹性位移计算中的应用**

虚力原理比较抽象，不容易理解。在回顾虚力原理的基础上，从简单结构（如桁架结构）为例推导出单位载荷载荷法，并多补充一些结构弹性位移计算例题的讨论，增加学生对虚力原理求弹性位移方法的理解。

**难点 3：静定和静不定结构受力和传力特点**

增加一些定性分析和讨论，以增加学生对力学基本原理的理解，突出分析问题的方法。

**难点 4：薄壁梁自由扭转剪流、相对扭转角和弯心的计算方法**

充分应用和发挥现代多媒体技术的优点，分步展现公式的建立和推导过程的细节，使教学过程更加生动、灵活，提高教学效率和教学效果。

**难点 5：薄板受压剪失稳分析基本方程的建立和临界载荷的计算方法。**

理论分析和多媒体技术相结合，充分展示公式的建立和推导过程，从简到繁以算例增加学生对方法的理解。

**难点 6：结构受力传力的理解**

增加实验环节的训练，培养学生的动手能力和应用知识的能力，提高学生的飞行结构受力、传力的分析能力，增强工程素质和创新能力。

课程能力培养说明:

明确以知识为载体进行能力训练和素质培养的观点,对课程教学中所传授的学科(课程所属学科)所特有的思维方法、研究手段进行说明,要能够说明课程教学中如何通过知识单元或若干个知识点的传授过程来达到何种素质的培养和何种能力的训练,

在教学中注重从该专业学生的知识结构出发,讲授本课程教学内容在学生专业知识结构中的位置和作用;注重将本课程的教学内容与其它相关课程的教学内容相联系;注重向学生讲授课程各部分教学内容的特点、联系与区别;注重给学生提炼教学内容中一些规律性的东西;注重引导学生在数学层面提炼出一些方法和结论,除掌握工程处理方法外尝试用更一般的数学方法解决问题;注重引导学生在学习飞行器结构力学时,学到“从薄到厚、从厚到薄”的学习方法。

积极采用现代化的教学技术和实物结构照片,开展多媒体教学,利用图文并茂,生动形象的多媒体手段,将以往一些抽象、枯燥的概念和公式通过动画等形式形象的展示在学生面前,启发学生们的思维,一改学生以往的对它们不易理解,难以接受的情况。又如通过注重引入工程实例,通过对飞行器结构的受力传力特点分析,强调力学问题是从工程中归纳而来,增强学生对工程计算方法的理解,从而提高学生处理工程问题的能力。通过启发式教学,引导学生积极思维,张开想象的翅膀自由的飞翔,让想象力和创新思维得到充分发挥。

总之,以课程知识为载体,通过课程教学训练,提高学生的建模能力、思维能力、计算能力、自学能力、动手能力、创新能力以及工程素质。

先修课程	高等数学、线性代数、理论力学、材料力学、弹性力学	
使用教材	史治宇,丁锡洪主编.飞行器结构力学.国防工业出版社,2015.	
参考书目与文献	1. 姜炳光,刘国春.结构力学.国防工业出版社,1980. 2. 龚尧南.结构力学基础.航空工业出版社,1993. 3. 薛明德,向志海.飞行器结构力学基础.清华大学出版社,2009. 4. Megson T. H. G. Aircraft structures for engineering students. Edward Arnold, 1972.	
课程相关主		
课程教学方式	理论讲授	
主要适用专	飞行器设计与工程	工程力学

课程组长意见		教学院长意见
(签名):		(签名):
年 月 日		年 月 日

# 南京航空航天大学

## 课程教学大纲

课程编号	01304040	开课学院	一院	开课系	0132
课程名称	中文	断裂力学		课程类别	选修
	英文	Fracture Mechanics			
课程学时	总学时	理论教学	实验教学	上机	课程设计
	32	32	0	0	1.有 √2.无
<p>课程简介：</p> <p style="padding-left: 2em;">简要描述课程的性质及专业地位，培养目标（理论、能力和技能）</p> <p style="padding-left: 2em;">本课程是工程力学专业的专业选修课程，是一门理论性、实用性、计算性很强的课程。主要讲授断裂力学的基本理论、方法及其在工程上的应用，重点包括线弹性断裂力学中的裂纹尖端邻域应力场和位移场、应力强度因子、能量释放率、线弹性断裂力学的修正以及弹塑性断裂力学部分内容。本课程的任务是使学生掌握应力强度因子的计算、裂纹扩展的判别、以及初步的弹塑性断裂力学内容，为学生从事工程结构破坏分析和结构耐久性/损伤容限设计工作奠定理论基础。</p>					

前修课程、能力和知识结构要求：

明确学生学习本门课程的前修课程，主要能力和知识结构。

先修课程：理论力学、材料力学、弹性力学、变分原理与有限元。

主要能力和知识结构：学生在学习本课程时应具备弹性力学、有限元等方面的基础知识，尤其对弹性力学基本方程和解法、能量原理等知识能够灵活运用，对航空航天、机械系统、土木等相关的工程背景有所了解。

课程结构说明：

对课程的组织结构进行简要说明，即明确课程所述内容由几个大的部分构成，每个部分的教学由哪几个环节或单元组成（如：理论授课、实验教学，上机实习，课外作业，随堂考试，讨论会，总结报告等）

本课程内容由绪论、裂纹尖端的应力场和位移场、应力强度因子计算、裂纹尖端的能量释放率、准脆性材料的断裂、复合型裂纹断裂判据、弹塑性断裂力学简要等几部分组成。各部分学时分配如下表：

序号	内 容	理论授课	实验教学	课堂讨论
1	绪论	4		
2	裂纹尖端的应力场和位移场	3		1
3	应力强度因子的计算	3		1
4	裂纹尖端的能量释放率	4		
5	准脆性材料的断裂	4		
6	复合型裂纹断裂判据	4		
7	弹塑性断裂力学简要	8		
总学时	32	30		2

本课程教学主要包括理论授课和考试。

课程知识结构说明:

明确课程涉及的学科知识领域、知识单元, 每个知识单元由哪些知识点构成以及每个知识单元的学习目标, 明确核心知识点(用“\*”标示)和扩展性知识点(用“ $\Delta$ ”标示)、必讲要求和选讲及自学要求。课程学时分布(按知识单元说明, 并对核心知识点与较大的知识点进行必要的学时标注)。课程如包含实验或实践性等环节, 还需要说明该部分的学时要求以及内容、方案和作用。

### 第一章 绪论 (4 学时)

主要讲授断裂力学的由来和产生、研究对象和任务、断裂力学的发展历程、晶体的理想断裂强度(\*)、应力判据( $\Delta$ )、裂纹的基本型式(\*)等内容。

### 第二章 裂纹尖端的应力场和位移场 (4 学时)

主要讲授 I 型裂纹尖端的应力场和位移场、II 型裂纹尖端的应力场和位移场、III 型裂纹尖端的应力场和位移场、应力强度因子的定义(\*)、应力强度因子判据(\*)等内容。

### 第三章 应力强度因子的计算 (4 学时)

主要讲授应力强度因子计算的解析法( $\Delta$ )、数值法( $\Delta$ ), 以及应力强度因子的工程计算方法(包括叠加原理的应用和组合法) (\*) 等内容。

### 第四章 裂纹尖端的能量释放率 (4 学时)

主要讲授含裂纹体的能量分析、能量释放率的概念(\*)、能量释放率准则(\*)、能量释放率的计算(\*)、能量释放率与应力强度因子的关系(\*)、能量释放率与柔度的关系( $\Delta$ ) 等内容。

### 第五章 准脆性材料的断裂 (4 学时)

主要讲授屈服准则( $\Delta$ )、III 型裂纹尖端塑性区、I 型裂纹尖端塑性区(\*)、II 型裂纹尖端塑性区、应力松弛效应和塑性区修正(\*)、线弹性断裂力学的适用范围(\*)等内容。

### 第六章 复合型裂纹的断裂判据 (4 学时)

主要讲授最大周向拉应力准则(\*)、最小应变能密度因子准则、能量释放率准则、工程判据 ( $\Delta$ ) 等内容。

### 第七章 弹塑性断裂力学简要 (8 学时)

主要讲授弹塑性断裂力学理论中的 COD 准则和 J 积分理论, 具体包括 COD 的定义(\*)、小范围屈服条件下的 COD 计算、D-M 模型( $\Delta$ ), 以及 J 积分的定义( $\Delta$ )、J 积分与 K、G 和 COD 的关系( $\Delta$ )、J 积分的计算( $\Delta$ ) 等内容。

课程考核形式与要求:

明确课程考核成绩由几个部分构成,考核的侧重点,相对于知识单元(或课程的各个构成部分)大致的分数分配。考核形式(如开卷考试、闭卷考试、面试、停课考试、随堂考试、总结报告等)。

课程成绩构成:以最终闭卷考试成绩为主。

课程考试形式:闭卷、不停课考试。

课程考试要求:概念题,约占45%;

简答题,约占30%;

计算题,约占25%。

课程教授方法说明:

指出课程教学中的难点、建议的应对策略、方法以及教学手段。

本课程的教学包括理论讲授、课堂讨论、答疑辅导等教学环节,在课程教学中适当采用多媒体课件,有效运用现代化教学手段的优势,同时注意以下诸方面:

- 1、针对理论性强、抽象特点,结合工程具体实例深入、详细讲解,如拍摄实际结构裂纹照片,增加感性认识。
- 2、由于学生缺乏工程经历与工程经验,建议加强学生的工程概念,突出工程中的力学问题,尽可能引入工程实例;

课程能力培养说明:

明确以知识为载体进行能力训练和素质培养的观点,对课程教学中所传授的学科(课程所属学科)所特有的思维方法、研究手段进行说明,要能够说明课程教学中如何通过知识单元或若干个知识点的传授过程来达到何种素质的培养和何种能力的训练,

通过课程的讲授、讨论等教学环节,训练和培养学生的以下能力:

- 1、建模能力:具有将实际工程裂纹问题抽象成为理想裂纹模型的能力,以及根据所学内容定性判断结构裂纹扩展型式等的的能力;
- 2、思维能力:通过包括推理、分析、判断的逻辑思维过程,对力学模型具有定性分析的能力;
- 3、计算能力:学习断裂力学中的计算方法,提高分析与计算的能力;
- 4、自学能力:具有阅读学习断裂力学及相关教学参考书的能力。

先修课程

高等数学、理论力学、材料力学、弹性力学、变分原理与有限元

使用教材	臧启山, 姚戈, 工程断裂力学简明教程, 中国科学技术大学出版社, 2014年5月	
参考书目与文献	1. H.L.Ewalds, R.J.H.Wanhill 著, 朱永昌等译. 断裂力学, 北京航空航天大学出版社 1987 2. 杨卫, 宏微观断裂力学, 国防工业出版社, 1995 3. 黄维扬, 工程断裂力学, 航空工业出版社, 1992 4. 切列帕诺夫, 脆性断裂力学, 科学出版社, 1978	
课程相关主要网站		
课程教学方式	理论讲授	
主要适用专业	工程力学	飞行器设计与工程
	机械工程	
课程组长意见	教学院长意见	
(签名):	(签名):	
年 月 日	年 月 日	